



TITLE:

Study of Radio-Loud Active Galactic Nuclei with X-Ray Observations(Digest_要約)

AUTHOR(S):

Tazaki, Fumie

CITATION:

Tazaki, Fumie. Study of Radio-Loud Active Galactic Nuclei with X-Ray Observations. 京都大学, 2014, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2014-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18080>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要旨は2014-06-23に公開

Study of Radio-Loud Active Galactic Nuclei with X-Ray Observations

(X 線観測による電波強度の大きい活動銀河核の研究)

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

田崎 文得

1 イントロダクション

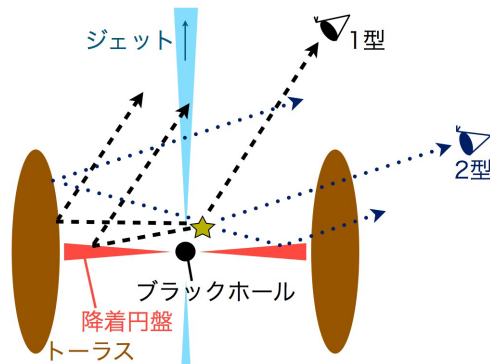
活動銀河核 (AGN) は超巨大質量ブラックホール (SMBH) を中心に持ち、そこへ激しくガスが降着することにより明るく輝いている天体である。SMBH は母銀河と「共進化」していると考えられており (Magorrian et al. 1998)、まさに SMBH の成長段階である AGN は、銀河の宇宙論的進化を解き明かす上で欠かせない重要な研究対象である。SMBH に流れ込むガスは降着円盤を形成し、主に可視光～X 線で明るく輝いている。SMBH の成長の糧となる降着ガスの起源はドーナツ状の「トーラス」であると考えられ、さらに中心核での活発な星形成もトーラスで起こっている可能性がある。つまり母銀河と SMBH とをつなぐトーラスは、共進化を実現する上で本質的な役割を持つ。さらに、radio-loud AGN から噴き出るジェットは、数 10 kpc もの空間スケールにわたって莫大なエネルギーを周囲のガスに与えることで、星形成と SMBH への質量降着を妨げることで母銀河へ影響している (AGN フィードバック現象)。

以上から、radio-loud AGN は SMBH 成長と銀河との共進化問題の重要な研究対象である。しかし、ジェットを持つ AGN の中心核構造は、持たない AGN とどのように異なるのか、ジェットの生成メカニズムは何か、といった基本的問題さえ未だ解決されていない。この問題に切り込むためには、ジェットと同時に、その根元である SMBH 近傍の物理状態を調べる必要がある。ジェットを正面から観測しているブレーザーが AGN ジェット研究の主流である中、ジェットの根元である「中心核」に着目し、その構造解明を系統的に行おうとした研究はこれまでにほとんどなかった。中心核の構造を調べやすい radio-quiet AGN (ジェットを持たない AGN) ではなく、ジェットを持つ AGN を対象とした本研究は、SMBH への降着流とその周辺構造とジェットの関係について、観測的に『直接』明確な答えを出そうとする斬新な手法である。

電波・硬 X 線にわたって強い放射を出す AGN に対し、X 線観測を行うことは、SMBH 近傍の最も重力ポテンシャルが深い領域を観ることを意味する。X 線は、相対論的ジェット噴出の起源となる、超強力重力場下における降着流の物理を理解する上で、最も重要な観測対象である。さらにダストによる減光の影響を受ける可視光と異なり、強い透過力を有する X 線はトーラスの構造を探索するために最適である。SMBH 周辺の高温電子雲からコンプトン散乱で出る X 線は、見込む角度や周辺構造によって、直接成分や透過成分、トーラスや降着円盤による反射成分として観測される。精度よい広域 X 線スペクトルが観測できれば、その形の特徴からこれらを分離し、中心核構造を制限することが可能である。私は、日

本の X 線衛星「すざく」、欧州の「XMM-Newton」、米国の「Swift」で観測された多数の radio-loud AGN の $0.5 - 200 \text{ keV}$ という広域に及ぶスペクトルを解析し、研究した。

AGN は中心核を見込む角度の違いで、1 型・2 型に分類される (図 1)。トーラスの開口部から中心核を観測する 1 型 AGN では、吸収の影響をほとんど受けずにブラックホール近傍の降着流を調べることができる。またトーラス越しに中心核を観測する 2 型 AGN では、吸収量と反射強度の両方を用いることでトーラス構造をより正確に明らかにできる。



2 2型 radio-loud AGN (3C 403 と IC 5063)

「すざく」と「Swift」で観測された 2 つの 2 型 radio-loud AGN、3C 403 と IC 5063 のスペクトルを解析した。「Swift」搭載 BAT 検出器の 58 ヶ月間にわたる平均スペクトルを「すざく」のデータと併せることで、 $0.5 - 200 \text{ keV}$ の広域 X 線スペクトルの性質を精密に決定することができた。両天体のスペクトルは次のような成分に分けられる。

図 1: AGN の統一描像と X 線放射の様子。radio-loud AGN はジェットを持つ。トーラスによる吸収の有無によって 1 型・2 型に分類される。

1. 低エネルギーで吸収を受け、高エネルギーで指数カットオフのかかったべき関数。
2. 連続成分と鉄 $K \alpha$ 輝線から成る、冷たい物質からの反射成分。
3. 吸収を受けていない軟 X 線成分。
4. 光電離した光学的に薄いガスによる散乱成分。

反射成分の強度は、BAT による平均フラックスで規格化すると、両天体ともに $R(\equiv \Omega/2\pi) \sim 0.6$ であり、反射体であるトーラスの立体角が十分大きいことがわかる。また、モンテカルロシミュレーションによって得られたトーラスの数値モデル (Ikeda et al. 2009) で予測される、開口角 50° のトーラスと観測スペクトルが良く一致した。radio-loud AGN にトーラスモデルを適用したのは本研究が初めてである。さらに、AGN 周辺の光学的に薄い X 線散乱ガスの量が少ないことから、radio-loud AGN ではジェットによってガスが掃き出されている可能性を示唆した。

3 高光度 radio-loud AGN (3C 206 と PKS 0707-35)

1 型 (3C 206) と 2 型 (PKS 0707-35) それぞれの高光度な radio-loud AGN の「すざく」と「Swift」による広帯域 X 線スペクトルを解析した。3C 206 と PKS 0707-35 の硬 X 線 ($14 - 195 \text{ keV}$) 光度はそれぞれ $10^{45.5} \text{ erg s}^{-1}$ と $10^{44.9} \text{ erg s}^{-1}$ である。

ジェットの根元を観測していると考えられる「電波中心核」の光度をもとに、3C 206 の X 線フラックスにおけるジェットの寄与を見積もった。AGN の統一描像によると、radio-loud AGN はジェットを真正面から観測している「ブレーザー」と同一種族であり、観測方向が

ジェットから逸れていることだけがブレーザーとの違いであると考えられている。したがって、ブレーザーのスペクトルエネルギー分布 (SED) を利用して、観測された電波中心核光度から X 線放射中のジェットの寄与を見積もることができる。本研究が初めてこの点に着目し、ブレーザーの平均 SED (Donato et al. 2001) から相対論的ビーミング効果を補正することで、3C 206 の観測 SED を予測することに成功した。その結果をもとに、ジェット成分を考慮したスペクトルフィッティングを行い、14 – 195 keV ではおよそ 60% ものジェット放射が含まれていることがわかった。一方、PKS 0707–35 のジェットによる X 線放射は無視できる。

観測スペクトルは、ジェット放射 (3C 206 のみ)、透過成分、トーラスと降着円盤による 2 つの反射成分、散乱成分 (PKS 0707–35 のみ) の合成でよく再現された。トーラスからの反射強度は、 $R_{\text{torus}} = 0.29 \pm 0.18$ (3C 206)、 0.41 ± 0.18 (PKS 0707–35) で、典型的な radio-quiet AGN での値 $R \sim 1$ よりも小さい。

トーラスモデルを利用すると、トーラスの開口角や赤道方向の水素柱密度を仮定して観測される鉄 K α 輝線の相対強度 (等価幅) を見積もることができる (図 2)。観測された 3C 206 の等価幅は < 71 eV という制限がついているので、

- 赤道方向の水素柱密度が $N_{\text{H}}^{\text{eq}} < 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ と小さい
- 開口角が $\theta_{\text{oa}} > 80^\circ$ ($N_{\text{H}}^{\text{eq}} = 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ の場合) と大きい

のいずれかである。これまでトーラス形状の研究には、反射と吸収両方の要素が得られる 2 型 AGN が対象だったが、本研究で初めて、1 型 AGN のトーラス形状に制限をつけることができた。また PKS 0707–35 の等価幅は 72 ± 36 eV で、予測される赤道方向の水素柱密度 $N_{\text{H}}^{\text{eq}} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ と、観測された視線方向の水素柱密度がほぼ一致している。

この結果、高光度の radio-loud AGN のトーラスは低光度のものと比べてほとんど発達していない、という興味深い示唆を得た。radio-quiet AGN では、X 線光度が $L_{2-10\text{keV}} \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ 以上のサンプルで、光度が大きくなるにつれて吸収を受けた AGN の割合が小さくなることが知られており、これはトーラスの立体角が小さくなっていることを示唆する (Ueda et al. 2003, Hasinger 2008, Burlon et al. 2011)。この現象は、「receding torus model (Lawrence 1991)」で説明でき、中心エンジンからの強い放射がトーラスの立体角や水素柱密度に影響を与えていると考えられる。以上から『中心エンジン光度–トーラス』の関係は、radio-quiet AGN と radio-loud AGN の両方で見られており、ジェットの有無によらず、AGN 放射によるフィードバックがトーラス構造に大きな影響を与えていることがわかる。

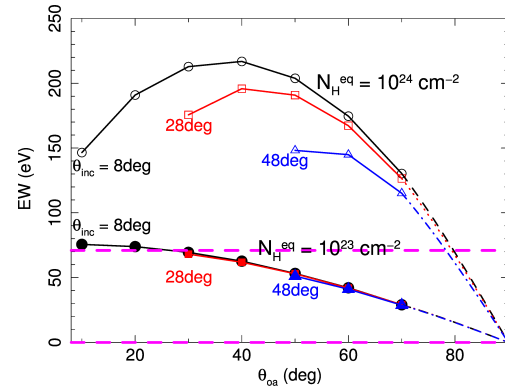


図 2: 1 型 AGN トーラスからの鉄 K α 輝線強度のシミュレーション結果 (実線)。トーラスモデル (Ikeda et al. 2009) のパラメータは、赤道方向の柱密度 (N_{H}^{eq})、見込み角 (θ_{inc})、開口角 (θ_{oa})。破線は 3C 206 の観測された相対的輝線強度 (等価幅: EW) の上下限値を示す。3C 206 は吸収体量が少ない ($N_{\text{H}}^{\text{eq}} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$) あるいは開口角が 80° 以上の小規模なトーラスを持つことがわかる。

4 radio-loud AGN の系統的研究

「Swift」による 58ヶ月間にわたる硬 X 線全天探査によって検出された radio-loud AGN に対して、系統的研究を行った。まず、「すざく」による全アーカイブデータを取得し、最新の検出器校正情報を使って慎重にデータ処理を行った。さらに「XMM-Newton」の観測結果も合わせて、1 型・2 型の両方を含む全 23 天体・44 観測のデータを得た。まず、中心核の電波光度と X 線光度の比 (X-ray radio loudness; $\log \nu L_{\nu, 5\text{GHz}}/L_{2-10\text{keV}}$) を本サンプルと、radio-quiet AGN のサンプルについて調べたところ、有意に本サンプルの方が相対的電波強度が高いことがわかった。この radio-loud AGN の広帯域スペクトル (0.5 – 195 keV) に今まで開発してきた AGN の統一モデルを適用し、中心エンジンからの直接成分、トーラスや降着円盤による反射成分、光電離した光学的に薄いガスによる散乱成分 (2 型のみ) に分解することで、中心核構造の理解を進めた。また、特に鉄 $K\alpha$ 輝線の構造に着目するために、3 – 9 keV の狭い帯域のみの解析も行った。すると、主にトーラスから放射されていると考えられる比較的細い輝線は、硬 X 線光度で規格化すると、radio-quiet AGN で報告されている「輝線強度の光度依存性」とほぼ一致することがわかった (図 3)。この光度依存性は「X-ray Baldwin effect (Iwasawa & Taniguchi 1993)」と呼ばれ、高光度な天体ほど輝線強度が弱いことから、前述の「receding torus model」で説明される。しかしながら、詳細に調べると、2 型 radio-loud AGN の輝線強度は 2 型 radio-quiet AGN に比べて 2 倍程度大きいことがわかった (図 3)。これは、ジェットの有無以外は同じであると考えられていた radio-loud AGN と radio-quiet AGN が、観測の見込み角が異なる等の、違う性質を持っている可能性を示唆する新しい成果である。

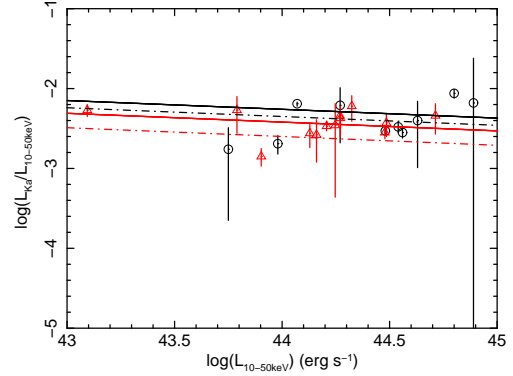


図 3: 硬 X 線光度 (14–195 keV) に対する、硬 X 線光度で規格化した鉄 $K\alpha$ 輝線光度。黒丸は 1 型、赤三角は 2 型の radio-loud AGN を表す。点破線は、Ricci et al. (2013) で得られた radio-quiet AGN の結果。実線は本サンプルに対してべき関数でフィッティングした結果で、傾きは Ricci et al. と同じ -0.11 に固定した。radio-quiet (点破線) と radio-loud (実線) の違いは、1 型 (黒) ではわずかなが、2 型 (赤) では radio-loud AGN の方が 2 倍程度大きい。

5 まとめ

銀河の中心にある超巨大質量ブラックホール (SMBH) は母銀河と共進化しており、ジェットを持っている radio-loud AGN は SMBH と母銀河両方の成長に影響を与えていると考えられる、重要な研究対象である。しかしながら、ジェットを持つ AGN と持たない AGN の中心核構造はどのように異なるのか、ジェットの生成メカニズムは何か、といった基本的問題さえ未解決である。そこで本研究では、ジェットの根元である「中心核」に着目し、X 線観測を利用してその構造解明を行った。SMBH 近傍の最も重力ポテンシャルが深い領域を観ることのできる X 線観測は、その強い透過力のためにダスト減光を受けにくいことが強

みである。X 線スペクトルは周辺の幾何構造に影響を受けるため、広帯域にわたる精密な観測を行うことで、中心核構造を制限することが可能である。

吸収を受けた (2 型) radio-loud AGN の研究では、トーラスからの反射強度が大きいことから、トーラスの立体角が十分大きいことがわかった。世界で初めて radio-loud AGN にトーラスの数値シミュレーションモデルを適用することで、開口角 50° のトーラスモデルと観測スペクトルがよく一致することを示した。

また 2 つの高光度 radio-loud AGN を調べ、吸収を受けている (2 型) PKS 0707-35 だけでなく、これまでトーラス構造を調べることでできなかった 1 型 AGN (3C 206) についても、その幾何構造に制限をつけた。具体的には、トーラスモデルを利用して、トーラスの開口部から観測した場合 (1 型) とトーラス越しに観測した場合 (2 型) の鉄 $K\alpha$ 輝線の強度が、トーラスの幾何構造にどのように依存するかを調べた。その結果、高光度の radio-loud AGN のトーラスは低光度のものと比べてほとんど発達していない、という示唆を得た。このことから、『中心エンジン光度 - トーラス』の関係は、radio-loud AGN でも radio-quiet AGN と同様に存在し、ジェットの有無によらず、AGN 放射によるフィードバックがトーラス構造に大きな影響を与えていることがわかった。さらに、3C 206 の研究では、電波中心核光度からジェットによる X 線放射の寄与を見積もり、この成分を考慮したスペクトル解析を行ったことも、本研究の特徴である。

Radio-loud AGN の中心核構造を理解するために、上記の研究から得られた X 線スペクトル解析の統一モデルを多数の radio-loud AGN に適用した。本研究では、硬 X 線全天探査によって検出された radio-loud AGN で、「すざく」と「XMM-Newton」で観測された全データ (23 天体・44 観測) を解析した。この結果、トーラスから放射される細い鉄 $K\alpha$ 輝線は、radio-quiet AGN で報告されている輝線強度と factor 2 程度で一致するが、やや大きな値になることがわかった。これは、radio-loud AGN では降着円盤がブラックホール近くまで伸びていないために、細い輝線の中に円盤からの放射が含まれてしまっていることが原因であると考えられる。また、特にその差は 2 型で顕著であることから、2 型の radio-loud AGN は典型的な 2 型 radio-quiet AGN と比べて小さい見込み角 (face-on に近い向き) から観測している可能性がある。